

## Проектирование неполяризующих интерференционных систем

В.Х. Фам<sup>1</sup>, Т.Ф. Нго<sup>1</sup>, Л.А. Губанова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

### Аннотация

Представлены методики построения конструкций интерференционных систем, которые обеспечивают малое расхождение между спектральными характеристиками энергетического коэффициента отражения (пропускания) для  $s$ - и  $p$ -поляризаций. Разработанные на основании этих методик системы состоят из слоёв, толщины которых кратны четверти длины волны. В зависимости от используемой методики построения количество пленкообразующих материалов, используемых для формирования входящих в состав интерференционных систем слоёв, может колебаться от двух до четырёх. Анализ спектральных характеристик полученных конструкций показал, что в рассматриваемом диапазоне спектра расхождение между интегральными характеристиками для  $s$ - и  $p$ -поляризаций меньше 2 %.

**Ключевые слова:** неполяризующие интерференционные системы, четвертьволновые оптические слои, спектральное и интегральное расхождение.

**Цитирование:** Фам, В.Х. Проектирование неполяризующих интерференционных систем / В.Х. Фам, Т.Ф. Нго, Л.А. Губанова // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 550-556. – DOI: 0.18287/2412-6179-2019-43-4-550-556.

### Введение

При исследовании оптических покрытий часто встречаются интерференционные системы, которые работают в условиях, когда излучение падает под некоторым углом. В этом случае прошедшее (отражённое) излучение обычно разделяется на две составляющие компоненты:  $s$ - и  $p$ -поляризация. Это явление служит основой для создания поляризаторов (анализаторов), которые широко используются в оптических системах различного назначения [1, 2]. Однако в ряде оптических систем этот эффект оказывается негативным [3]. Например, во многих интерферометрах необходимо деление интенсивности светового потока, при этом деление на  $s$ - и  $p$ -компоненты нежелательно. Оптические элементы, которые удовлетворяют вышеуказанным требованиям, называются неполяризующими светоделителями. В последние годы неполяризующие светоделители использовались в оптических системах с целью создания уникальных интерферометров для измерения различных величин с высокой точностью [4, 5].

Одной из актуальных задач в исследовании оптических интерференционных покрытий, работающих при наклонном падении, является поиск конструкций интерференционных систем, которые обеспечивают минимальное расхождение между поляризациями прошедшего (отражённого) излучения. В идеальном случае коэффициенты отражения и пропускания для  $s$ - и  $p$ -поляризаций должны быть равны в широком спектральном диапазоне [6].

Исследование оптических покрытий, позволяющее получить минимальное расхождение между поляризованным излучением в отражении, проводится по двух направлениям. При работе в первом направлении следует использовать свойство металлов, которое обеспечивает малое расхождение между двумя поляризациями [7]. Металлические пленки обладают меньшим деполаризующим эффектом, чем диэлектрики. Многослойные системы, содержащиеся в кон-

струкциях металлические слои, могут иметь приблизительно постоянный коэффициент пропускания (отражения) в довольно широкой спектральной области с незначительной разницей в двух компонентах  $s$  и  $p$ . В этом случае оптимальными будут конструкции интерференционных покрытий, в состав которых входят слои, изготовленные как из металлических, так и из диэлектрических материалов. Однако использование металлических слоёв часто сопровождается нежелательными эффектами, такими как потери интенсивности за счёт поглощения в металлах и искажение полученных синтезированных характеристик из-за значительной дисперсии показателей преломления и поглощения металлов.

Второе направление основывается на использовании интерференционных систем, состоящих только из диэлектрических слоёв. В настоящее время существует ряд методик для поиска конструкций диэлектрических интерференционных систем, которые обеспечивают минимальную поляризацию прошедшего (отражённого) излучения. П. Баумейстер в 1961 году [8] и В.Р. Костич в 1970 году [9] первыми описали теорию неполяризующих интерференционных систем, основанную на использовании двух пленкообразующих материалов. П. Баумейстер в своей работе предлагал конструкцию вида *стекло*|(BH)<sup>n</sup>|*воздух*, где  $B$  и  $H$  – четвертьволновые слои, изготовленные из материалов с высоким и низким показателями преломления соответственно,  $n$  – число повторений основной ячейки  $BH$ . Также им была предложена связь между показателями преломления пленкообразующих материалов  $n_B$  и  $n_H$ , числом  $n$  и углом падения излучения, обеспечивающая пропускание  $T=0,5$  и степень поляризации  $P=0$ . В.Р. Костич в работе [9] изложил свою методику уменьшения поляризующего эффекта интерференционных покрытий. Для реализации этой методики используется комбинация слоёв, нечувствительных к поляризации, одним из примеров которой является некая ячейка  $(0,5BH0,5B)$ , где  $n_B=(3)^{1/2}n_H$ . Данная

комбинация слоёв позволяет превратить массивные среды в эффективные массивные среды, обладающие эффектом малого поляризационного расщепления их эффективных показателей преломления. Этот результат достигается за счёт добавления в структуру покрытия нескольких слоёв, показатели преломления которых выбираются по изложенной в работе [9] методике. Общим недостатком в методиках уменьшения поляризационного эффекта интерференционных систем, предложенных в работах П. Баумейстера и В.Р. Костица, является то, что для показателей преломления материалов, прозрачных в видимой области спектра, они не смогли найти решение, которое бы состояло из небольшого количества слоёв и исключало поляризационные эффекты. В 1976 году А. Телен [10] показал, что подобные неполяризующие интерференционные системы могут быть спроектированы при использовании трёх или более плёнообразующих материалов. В своей работе он рассмотрел математический метод поиска структуры интерференционных систем, изготовленных из фторида магния ( $MgF_2$ ), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и оксида титан ( $TiO_2$ ) так, чтобы расхождение между спектральными характеристиками для  $s$ - и  $p$ -поляризаций было минимально. Основным недостатком предложенных решений является наличие областей спектра с равными значениями  $T$  и  $R$ , которые не являются протяженными. В последнее время применение численных методов оптимизации в поиске конструкций неполяризующих интерференционных систем позволяет получить очень эффективные конструкции покрытий [11–16]. Недостатком конструкций, полученных при использовании этих методов, являются достаточно сложные структуры интерференционных систем, поскольку в их состав входит большое количество слоёв, имеющих разные толщины, что приводит к трудностям контроля процесса формирования слоёв и высокой трудоемкости процесса производства на промышленном уровне.

В данной работе рассматриваются разработанные методики построения неполяризующих интерференционных систем, имеющие более простую конструкцию, когда в состав покрытия входят слои с толщинами, кратными четверти длины волны, слои изготавливаются из двух, трёх или четырёх разных плёнообразующих материалов.

### 1. Постановка задачи и ход её решения

Поиск конструкций неполяризующих интерференционных покрытий заключается в установлении соотношений между показателями преломления материалов, из которых формируются слои, их оптическими толщинами, показателями преломления обрамляющих сред и углом падения излучения, с целью обеспечения равных энергетических коэффициентов пропускания (отражения) для  $s$ - и  $p$ -поляризаций. Последнее является основой для построения математической модели, позволяющей выбрать необходимые параметры конструкции для получения неполяризующих интерференционных систем.

Рассматриваемые интерференционные системы в данной работе состоят из слоёв, оптические толщины которых равны или кратны четверти длины волны  $\lambda_0$  (рис. 1). Каждый слой системы характеризуется показателем преломления  $n_j$  и оптической толщиной  $n_j d_j = \lambda_0/4$ , ( $j = 1, 2, 3, \dots$ ). Показатели преломления сред, содержащие падающее и прошедшее излучения,  $n_0$  и  $n_m$  соответственно. Угол падения излучения на многослойную систему  $\alpha_0$ . Количество слоёв, входящих в состав системы, обозначается буквой  $N$ .

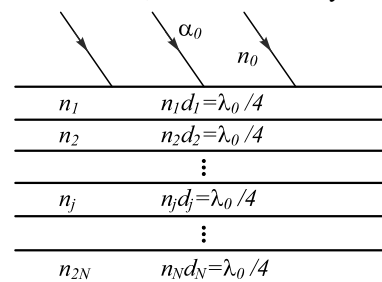


Рис. 1. Структура рассматриваемой интерференционной системы

Задачей исследования является нахождение методики определения значений показателей преломления  $n_j$  материалов, из которых формируются слои, так чтобы между спектральными характеристиками для  $s$ - и  $p$ -поляризаций прошедшего излучения наблюдалось минимальное расхождение. Для решения этой задачи сначала рассматривается энергетический коэффициент отражения прошедшего (отражённого) излучения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций как функция параметров рассматриваемой интерференционной системы:  $R_{s,p} = f(n_{s,p}, n d_{s,p}, \alpha_0, \lambda, \dots)$ . Расчёт данной зависимости может быть реализован на основе матричного метода расчёта многослойных структур, который подробно представлен в работе [17]. Далее при фиксировании значений некоторых оптических параметров интерференционной системы в условии ограничения на толщины слоёв, которые были введены ранее (четвертьволновые слои), эта зависимость может быть представлена в упрощённом виде: как зависимость от показателей преломления материалов слоёв, формирующих интерференционную систему  $R_{s,p} = f(n_{s,p})$ . Используя полученную зависимость и сопоставляя её с условием отсутствия поляризации  $R_s = R_p$ , определим соотношение между показателями преломления материалов, из которых формируются слои, входящие в состав покрытия.

### 2. Методика поиска конструкций неполяризующих интерференционных систем, изготовленных из двух плёнообразующих материалов

Сначала рассмотрим возможность построения конструкций неполяризующих интерференционных систем, в состав которых входят слои, изготовленные из двух плёнообразующих материалов, имеющих различные показатели преломления. Рассматриваемая структура имеет вид:  $n_0(HB)^k H n_m$ . Для такой струк-

туры энергетический коэффициент отражения при нормальном падении излучения рассчитывается по формуле [18]:

$$R = \left( \frac{1 - (n_H / n_B)^{2k} (n_H^2 / n_0 n_m)}{1 + (n_H / n_B)^{2k} (n_H^2 / n_0 n_m)} \right)^2 \quad (1)$$

В случае, когда излучение падает на интерференционное покрытие под некоторым углом, энергетические коэффициенты отражения для *s*-поляризации  $R_s$  и *p*-поляризации  $R_p$  рассчитываются по приведенной формуле, показатели преломления  $n_H, n_B, n_0$  и  $n_m$  следует заменить на показатели преломления для *s*- и *p*-поляризации  $n_{Hs}, n_{Bs}, n_{0s}, n_{ms}$  и  $n_{Hp}, n_{Bp}, n_{0p}, n_{mp}$  соответственно. Исходя из условия  $R_s = R_p$  (условие отсутствия поляризации) и после ряда математических преобразований было получено соотношение между показателями преломления плёнообразующих материалов, которое может быть представлено в виде:

$$(\Delta n_H)^{2k+2} = \Delta n_0 \cdot \Delta n_m \cdot (\Delta n_B)^{2k} \quad (2)$$

Величина  $\Delta n_j$  каждого слоя определяется отношением показателя преломления слоя для *s*-поляризации к показателю преломления для *p*-поляризации и является зависимостью показателей преломления материала, формирующего слой, и угла падения излучения на данную систему ( $\alpha_0$ ), которая может быть представлена в виде:

$$\Delta n_j = n_{j,s} / n_{j,p} = 1 / \left( 1 - (n_0 \sin \alpha_0 / n_j)^2 \right), \quad (3)$$

где  $n_{j,s}$  и  $n_{j,p}$  – показатель преломления *j*-го слоя для *s*- и *p*-поляризации соответственно:  $n_{j,s} = n_j \cos \alpha_j$  и  $n_{j,p} = n_j / \cos \alpha_j$  ( $\alpha_j$  – угол распространения излучения в *j*-м слое).

Из соотношений (2) и (3) можно определить показатель преломления одного из плёнообразующих материалов при условии, что показатель преломления второго материала известен, выбран из набора реально используемых плёнообразующих материалов.

В качестве примера рассмотрим интерференционную систему, изготовленную из плёнообразующих материалов с показателями преломления  $n_H = 1,77$  и  $n_B = 2,08$ , которые удовлетворяют приведенному требованию. Структура данной системы имеет вид: Воздух|2В(НВ)<sup>5</sup>Н2В|К8, где 2В – добавленный слой, имеющий полуволновую толщину, который позволяет улучшать неполяризующий эффект и К8 – марка оптического стекла, из которого изготавливается подложка ( $n_m = 1,52$ ). Спектральные характеристики коэффициента отражения полученной системы в диапазоне длин волн 460–540 нм показаны на рис. 2. Максимальное расхождение между спектральными характеристиками для *s*- и *p*-поляризации энергетического коэффициента отражения наблюдается на краях рассматриваемого диапазона длин волн, 460–500 нм и 530–540 нм. Разница между интегральными коэффициентами отражения для *s*- и *p*-поляризации ( $R_{i,s} - R_{i,p}$ ) в этом диапазоне спектра составляет 2,00%. Здесь

под интегральным коэффициентом отражения (пропускания) в некотором диапазоне спектра ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) подразумевается среднее значение коэффициента отражения (пропускания) в рассматриваемом диапазоне спектра и определяется по формуле:

$$R_{i,s,p} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{R_{s,p}(\lambda)}{\lambda_2 - \lambda_1} d\lambda \quad (4)$$

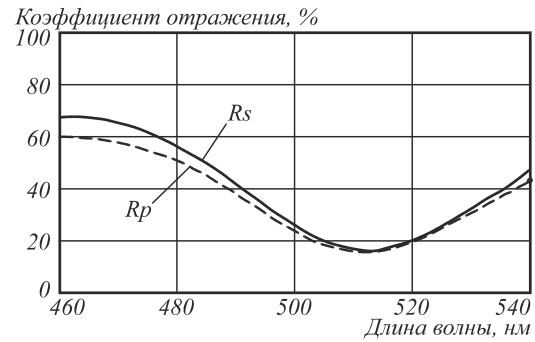


Рис. 2. Спектральные характеристики системы Воздух|2В(НВ)<sup>5</sup>Н2В|К8 для *s*- и *p*-поляризации,  $\lambda_0 = 500$  нм, угол падения излучения 45°

Для оценки отклонения спектрального коэффициента отражения для *s*-поляризации от спектрального коэффициента отражения для *p*-поляризации используется среднее квадратическое отклонение (сокращённо СКО). В данной работе оценка СКО определяется как:

$$\Delta R = \left( \frac{1}{t-1} \cdot \sum_{i=1}^t [R_s(\lambda_i) - R_p(\lambda_i)]^2 \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где  $t$  – количество отсчётов на шкале длин волн и  $\lambda_i$  – значение длины волны в *i*-й точке. Чем больше величина  $t$ , тем точнее значение  $\Delta R$ .

По формуле (5) находят значение СКО спектральных характеристик коэффициента отражения рассматриваемой системы  $\Delta R = 5,63\%$  при величине  $t = 800$ .

Видно, что диапазон длин волн, в котором расхождение между спектральными характеристиками для *s*- и *p*-поляризации энергетического коэффициента отражения незначительное, в этом случае оказывается недостаточно широким. Для расширения этого диапазона следует использовать конструкции интерференционных систем, в состав которых входят слои, изготовленные из большего количества плёнообразующих материалов.

### 3. Методика поиска конструкций неполяризующих интерференционных систем, изготовленных из трёх плёнообразующих материалов

Энергетический коэффициент пропускания многослойной системы определяется зависимостью между показателями преломления плёнообразующих материалов при ограничении на толщины слоёв, которые введены (четвертьволновые слои). Эту зависимость можно записать в виде, представленном в [19] для фиксированной длины волны ( $\lambda_0$ ):

$$T = T(x) = 4 / (2 + x^2 + x^{-2}), \quad (6)$$

где если количество слоёв системы чётное  $N = 2k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), то

$$x = (n_0 / n_m)^{1/2} \cdot \left( \prod_{i=1}^k n_{2i} / \prod_{i=1}^k n_{2i-1} \right),$$

если количество слоёв, формирующих систему, нечётное  $N = 2k+1$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), то

$$x = (n_0 n_m)^{1/2} \cdot \left( \prod_{i=1}^k n_{2i} / \prod_{i=1}^k n_{2i+1} \right).$$

Положим, что  $n_1 = n_5 = \dots = n_{4k+1}$ ,  $n_2 = n_4 = \dots = n_{2k}$ ,  $n_3 = n_7 = \dots = n_{4k-1}$ , т.е. система изготавливается из трёх плёнообразующих материалов. Используя это предположение в соответствии с условием отсутствия поляризации  $T_s = T_p$ , после нескольких математических преобразований получены окончательные зависимости для определения параметров многослойной системы, имеющие вид:

$$(\Delta n_0 / \Delta n_m)^{1/2} \cdot (\Delta n_2)^k = (\Delta n_1)^{[k/2+1/2]} \cdot (\Delta n_3)^{[k/2]} \quad (7)$$

в случае, когда количество слоёв является чётным, и

$$(\Delta n_0 \cdot \Delta n_m)^{1/2} \cdot (\Delta n_2)^k = (\Delta n_1)^{[k/2]+1} \cdot (\Delta n_3)^{[k/2]} \quad (8)$$

в случае, когда количество слоёв является нечётным. Здесь знак квадратной скобки  $[x]$  используется для обозначения операции выделения целой части вещественного числа  $x$ . Из представленных зависимостей можно определить значение показателя преломления любого слоя, когда известны значения показателей преломления материалов, из которых изготовлены граничные с ним слои. На рис. 3 представлены спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения многослойной системы, структура которой построена по изложенной методике. Рассматриваемая многослойная система состоит из 25 четвертьволновых слоёв, изготовленных из плёнообразующих материалов с показателями преломления  $n_1 = 1,38$ ,  $n_2 = 1,72$  и  $n_3 = 2,35$ . Структуру полученной системы можно представить в виде  $\text{Воздух} | (\text{HCBC})^6 \text{H} | \text{K8}$ , где  $H$ ,  $C$  и  $B$  – обозначения четвертьволновых слоёв, изготовленных из материалов, имеющих низкий ( $n_1 = 1,38$ ), средний ( $n_2 = 1,72$ ) и высокий ( $n_3 = 2,35$ ) показатель преломления соответственно. Из этого рисунка видно, что расхождение между спектральными характеристиками энергетического коэффициента отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций достаточно мало в диапазоне длины волн 460–540 нм. Разница между интегральными коэффициентами отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций ( $R_{s,i} - R_{p,i}$ ) в этом диапазоне спектра составляет 0,14%. Значение СКО в этом случае  $\Delta R = 1,17\%$  при величине  $t = 800$ .

#### 4. Методика поиска конструкций неполяризующих интерференционных систем, изготовленных из четырёх плёнообразующих материалов

Далее рассмотрена методика построения конструкций неполяризующих интерференционных систем, слои которых изготавливают из четырёх плёнообразующих материалов, имеющих разные показате-

ли преломления. Используя математические вычисления, аналогичные приведенным выше, при условии, что  $n_1 = n_5 = \dots = n_{4k+1}$ ,  $n_2 = n_6 = \dots = n_{4k+2}$ ,  $n_3 = n_7 = \dots = n_{4k-1}$ ,  $n_4 = n_8 = \dots = n_{4k+4}$ , получим зависимости для определения параметров многослойной системы, имеющие вид:

$$\begin{aligned} & (\Delta n_0 / \Delta n_m)^{1/2} \cdot (\Delta n_2)^{[k/2+1/2]} \cdot (\Delta n_4)^{[k/2]} = \\ & = (\Delta n_1)^{[k/2+1/2]} \cdot (\Delta n_3)^{[k/2]} \end{aligned} \quad (9)$$

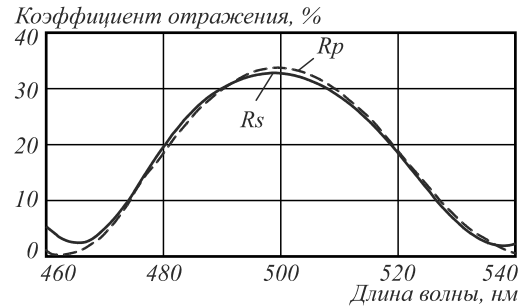


Рис. 3. Спектральные характеристики системы  $\text{Воздух} | (\text{HCBC})^6 \text{H} | \text{K8}$  для  $s$ - и  $p$ -поляризаций,  $\lambda_0 = 500$  нм, угол падения излучения  $45^\circ$

в случае, когда количество слоёв является чётным, и

$$\begin{aligned} & (\Delta n_0 \cdot \Delta n_m)^{1/2} \cdot (\Delta n_2)^{[k/2+1/2]} \cdot (\Delta n_4)^{[k/2]} = \\ & = (\Delta n_1)^{[k/2]+1/2} \cdot (\Delta n_3)^{[k/2]} \end{aligned} \quad (10)$$

в случае, когда количество слоёв является нечётным. В качестве примера представлена интерференционная система, состоящая из 25 слоёв, изготовленных из плёнообразующих материалов с показателями преломления  $n_1 = 1,38$ ,  $n_2 = 1,81$ ,  $n_3 = 2,35$  и  $n_4 = 1,64$ . Структура этой системы имеет следующий вид  $\text{Воздух} | (\text{HC}_1 \text{BC}_2)^6 \text{H} | \text{K8}$ , где  $C_1$  и  $C_2$  – обозначения четвертьволновых слоёв, имеющих среднее значение показателя преломления материалов, из которых изготовлены слои,  $n_2 = 1,81$  и  $n_4 = 1,64$  соответственно. Спектральные характеристики коэффициента отражения этой системы в диапазоне длин волн 460–540 нм показаны на рис. 4. Разница между интегральными коэффициентами отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций ( $R_{s,i} - R_{p,i}$ ) в этом диапазоне спектра составляет 0,05%, что в 2,8 раз меньше, чем в случае, когда система изготавливается из трёх плёнообразующих материалов, характеристики которой представлены выше. Значение СКО в этом случае  $\Delta R = 1,83\%$  при величине  $t = 800$ .

#### 5. Влияние отклонения угла падения излучения на спектральные характеристики неполяризующих интерференционных систем

Выше рассмотрены методики поиска конструкций неполяризующих интерференционных систем при определённом угле падения излучения. Однако на практике всегда существует отклонение угла падения излучения от номинального. Анализ стабильности спектральной характеристики разработанных конструкций в зависимости от отклонения угла падения

излучения является важной стадией в проектировании интерференционных систем, работающих под наклонным падением.

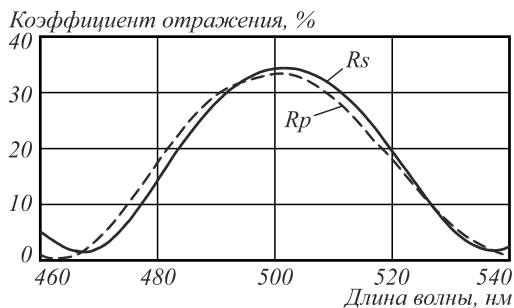


Рис. 4. Спектральные характеристики системы Воздух|(НС1ВС2)6Н|К8 для s- и p-поляризации,  $\lambda_0 = 500$  нм, угол падения излучения  $45^\circ$

На рис. 5 проведено распределение коэффициентов отражения системы вида Воздух|(НСВС)6Н|К8 для s- и p-поляризации в диапазоне длины волны от 460 нм до 540 нм и угла падения излучения от  $40^\circ$  до  $50^\circ$ . Номинальное значение угла падения излучения –  $45^\circ$ , отклонение составляет  $\pm 5^\circ$ .

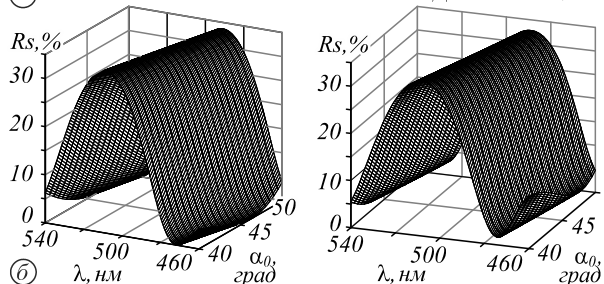
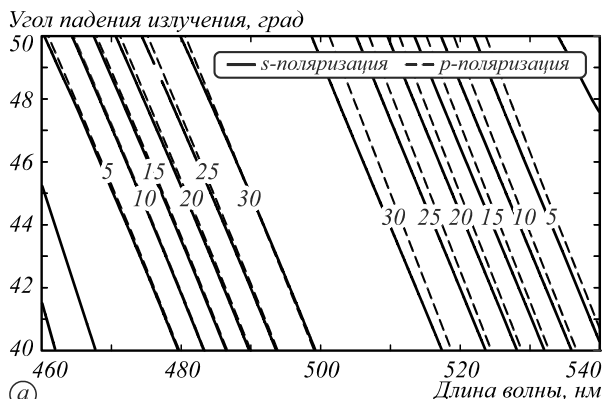


Рис. 5. Распределение коэффициентов отражения для s- и p-поляризации при разных углах падения излучения (а); 3D-распределение коэффициентов отражения для s- и p-поляризации (б)

Как видно из рис. 5а, при разных углах падения излучения расхождение спектральной характеристики между двумя поляризациями является незначительным. Значительная разница наблюдается на краях рассматриваемого диапазона, вокруг точек ( $40^\circ$ , 460 нм) и ( $50^\circ$ , 540 нм). На рис. 5б показано распределение коэффициентов отражения для s- и p-поляризации в виде 3D-графика. Данное распределение показывает, что разработанная конструкция обеспечивает стабильность спектральной характери-

стики неполяризующих интерференционных систем в вариации угла падения излучения.

### Заключение

В данной работе рассмотрены методики построения конструкции неполяризующих интерференционных покрытий, изготовленных из двух, трёх или четырёх плёнообразующих материалов. Полученные результаты определяют связь между параметрами слоёв, формирующих интерференционную систему, которая обеспечивает малое расхождение между спектральными характеристиками энергетического коэффициента отражения (пропускания) для s- и p-поляризаций. Полученные структуры покрытий достаточно просты в реализации, потому что они состоят из небольшого количества слоёв, толщины которых кратны четверти длины волны. Анализ спектральных характеристик коэффициента отражения разработанных структур показал, что расхождение в рассматриваемом диапазоне спектра между интегральными характеристиками для s- и p-поляризаций не превышает 2%. С увеличением количества плёнообразующих материалов, используемых для формирования интерференционной структуры, повышается возможность получения минимальной разницы между интегральными коэффициентами отражения для s- и p-поляризаций.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проект 16.1651.2017/4.6).

### Литература

1. Karpeev, S.V. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer / S.V. Karpeev, V.D. Paragin, S.N. Khonina // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19, Issue 5. – 055701. – DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.
2. Runyon, M.T. Implementation of nearly arbitrary spatially varying polarization transformations: an in-principle lossless approach using spatial light modulators / M.T. Runyon, C.H. Nacked, A. Sit, M. Granados-Baez, L. Giner, J.S. Lundeen // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57, Issue 20. – P. 5769-5778. – DOI: 10.1364/AO.57.005769.
3. Baumeister, P.W. Optical coating technology / P.W. Baumeister. – Bellingham, Washington: SPIE Press, 2004. – 840 p. – ISBN: 978-0-8194-5313-6.
4. Lou, Y. Laser homodyne straightness interferometer with simultaneous measurement of six degrees of freedom motion errors for precision linear stage metrology / Y. Lou, L. Yan, B. Chen, S. Zhang // Optics Express. – 2017. – Vol. 25, Issue 6. – P. 6805-6821. – DOI: 10.1364/OE.25.006805.
5. Niwa, Y. Long-term stabilization of a heterodyne metrology interferometer down to a noise level of 20 pm over an hour / Y. Niwa, K. Arai, A. Ueda, M. Sakagami, N. Gouda, Y. Kobayashi, Y. Yamada, T. Yano // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, Issue 32. – P. 6105-6110. – DOI: 10.1364/AO.48.006105.
6. Macleod, A.H. Thin-film optical filters / A.H. Macleod. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. – 800 p. – ISBN: 978-1-4200-7302-7.

7. **Knittl, Z.** Optics of thin films / Z. Knittl. – London: John Wiley and Sons, 1975. – 551 p.
8. **Baumeister, P.** The transmission and degree of polarization of quarter-wave stacks at non-normal incidence / P. Baumeister // Optica Acta: International Journal of Optics. – 1961. – Vol. 8, Issue 2. – P. 105-119. – DOI: 10.1080/713826378.
9. **Costich, V.R.** Reduction of polarization effects in interference coatings / V.R. Costich // Applied Optics. – 1970. – Vol. 9, Issue 4. – P. 866-870. – DOI: 10.1364/AO.9.000866.
10. **Thelen, A.** Nonpolarizing interference films inside a glass cube / A. Thelen // Applied Optics. – 1976. – Vol. 15, Issue 12. – P. 2983-2985. – DOI: 10.1364/AO.15.002983.
11. **Wang, W.** Design and analysis of all-dielectric broadband nonpolarizing parallel-plate beam splitters / W. Wang, S. Xiong, Y. Zhang // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46, Issue 16. – P. 3185-3191. – DOI: 10.1364/AO.46.003185.
12. **Wang, W.** Wide-angle and broadband nonpolarizing parallel plate beam splitter / W. Wang, L. Yang, J. Schoen, Y. Namba, S. Li // Proceedings of SPIE. – 2009. – Vol. 7282. – 72821F. – DOI: 10.1117/12.830871.
13. **Jin, H.S.** Design and analysis of metal-dielectric nonpolarizing beam splitters in a glass cube / H.S. Jin, Y.G. Chun, P.W. Zheng // Applied Optics. – 2009. – Vol. 48, Issue 18. – P. 3385-3390. – DOI: 10.1364/AO.48.003385.
14. **Henderson, A.R.** The design of non-polarizing beam splitters / A.R. Henderson // Thin Solid Films. – 1978. – Vol. 51, Issue 3. – P. 339-347. – DOI: 10.1016/0040-6090(78)90297-3.
15. **Tikhonravov, A.V.** Development of the needle optimization technique and new feature of OptiLayer design software / A.V. Tikhonravov, M.K. Trubetskov // Proceedings of SPIE. – 1994. – Vol. 2253. – P. 10-20.
16. **Shi, J.H.** Theoretical analysis of two nonpolarizing beam splitters in asymmetrical glass cubes / J.H. Shi, Z.P. Wang // Applied Optics. – 2008. – Vol. 47, Issue 13. – P. 275-278. – DOI: 10.1364/AO.47.00C275.
17. **Путилин, Э.С.** Оптические покрытия / Э.С. Путилин, Л.А. Губанова. – СПб.: Издательство «ЛАНЬ», 2016. – 268 с. – ISBN: 978-5-8114-2005-6.
18. **Hongji, Q.** Nonpolarizing and polarizing filter design / Q. Hongji, H. Ruijin, Y. Kui, S. Jianda, F. Zhengxiu // Applied Optics. – 2005. – Vol. 44, Issue 12. – P. 2343-2348. – DOI: 10.1364/AO.44.002343.
19. **Vasicek, A.** Optics of thin films / A. Vasicek. – North-Holland, Amsterdam: Interscience Publishers, 1960. – 187 p. – ISBN: 978-1-124-14201-2.

### Сведения об авторах

**Фам Ван Хоа**, 1990 года рождения, в 2016 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (университет ИТМО) по специальности «Оптехника». Является аспирантом факультета фотоники и оптоинформатики университета ИТМО. Область научных интересов: обработка оптических деталей, физика тонких плёнок. E-mail: [vhoapham@gmail.com](mailto:vhoapham@gmail.com).

**Нго Тхай Фи**, 1987 года рождения, в 2014 году окончил Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (университет ИТМО) по специальности «Оптехника». Является аспирантом факультета фотоники и оптоинформатики университета ИТМО. Область научных интересов: физика тонких плёнок, обработка оптических систем, программирование. E-mail: [ngothaiphbn@gmail.com](mailto:ngothaiphbn@gmail.com).

**Губанова Людмила Александровна**, доктор технических наук, профессор, окончила Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (университет ИТМО), кафедра оптоинформационных технологий и материалов. Область научных интересов: оптика тонких плёнок, физика тонких плёнок, технология изготовления оптических покрытий. E-mail: [la7777@mail.ru](mailto:la7777@mail.ru).

ГРНТИ: 29.19.16

Поступила в редакцию 30 мая 2016 г. Окончательный вариант – 11 января 2017 г.

## Search for designs of nonpolarizing interference systems

V.K. Pham<sup>1</sup>, T.P. Ngo<sup>1</sup>, L.A. Gubanova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, 197101, Saint-Petersburg, Russia

### Abstract

This research looks into methods for searching of designs of nonpolarizing interference systems, which provide a small discrepancy between spectral characteristics of the energy reflection/transmission coefficient for s- and p- polarizations. The layer thickness of these systems is a multiple of a quarter wavelength. Depending on the method used, the number of film-forming materials can vary from two to four. Analysis of spectral characteristics shows that in the spectral range of interest the discrepancy between the integral characteristics for s- and p-polarizations is less than 2%.

**Keywords:** nonpolarizing interference systems, quarter-wave optical layers, spectral and integral discrepancy.

**Citation:** Pham VK, Ngo TP, Gubanova LA. Search for designs of nonpolarizing interference systems. Computer Optics 2019; 43(4): 550-556. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-550-556.

*Acknowledgements:* This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project 16.1651.2017/4.6).

### References

- [1] Karpeev SV, Paranin VD, Khonina SN. Generation of a controlled double-ring-shaped radially polarized spiral laser beam using a combination of a binary axicon with an interference polarizer. *J Opt* 2017; 19(5): 055701. DOI: 10.1088/2040-8986/aa640c.
- [2] Runyon MT, Nacke CH, Sit A, Granados-Baez M, Giner L, Lundeen JS. Implementation of nearly arbitrary spatially varying polarization transformations: an in-principle lossless approach using spatial light modulators. *Appl Opt* 2018; 57(20): 5769-5778. DOI: 10.1364/AO.57.005769.
- [3] Baumeister PW. *Optical coating technology*. Bellingham, Washington: SPIE Press; 2004. ISBN: 978-0-8194-5313-6.
- [4] Lou Y, Yan L, Chen B, Zhang S. Laser homodyne straightness interferometer with simultaneous measurement of six degrees of freedom motion errors for precision linear stage metrology. *Opt Express* 2017; 25(6): 6805-6821. DOI: 10.1364/OE.25.006805.
- [5] Niwa Y, Arai K, Ueda A, Sakagami M, Gouda N, Kobayashi Y, Yamada Y, Yano T. Long-term stabilization of a heterodyne metrology interferometer down to a noise level of 20 pm over an hour. *Appl Opt* 2009; 48(32): 6105-6110. DOI: 10.1364/AO.48.006105.
- [6] Macleod AH. *Thin-film optical filters*. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2010. ISBN: 978-1-4200-7302-7.
- [7] Knittl Z. *Optics of thin films*. London: John Wiley and Sons; 1975.
- [8] Baumeister P. The transmission and degree of polarization of quarter-wave stacks at non-normal incidence. *Optica Acta* 1961; 8(2): 105-119. DOI: 10.1080/713826378.
- [9] Costich VR. Reduction of polarization effects in interference coatings. *Appl Opt* 1970; 9(4): 866-870. DOI: 10.1364/AO.9.000866.
- [10] Thelen A. Nonpolarizing interference films inside a glass cube. *Appl Opt* 1976; 15(12): 2983-2985. DOI: 10.1364/AO.15.002983.
- [11] Wang W, Xiong S, Zhang Y. Design and analysis of all-dielectric broadband nonpolarizing parallel-plate beam splitters. *Appl Opt* 2007; 46(16): 3185-3191. DOI: 10.1364/AO.46.003185.
- [12] Wang W, Yang L, Schoen J, Namba Y, Li S. Wide-angle and broadband nonpolarizing parallel plate beam splitter. *Proc SPIE* 2009; 7282: 72821F. DOI: 10.1117/12.830871.
- [13] Jin HS, Chun YG, Zheng PW. Design and analysis of metal-dielectric nonpolarizing beam splitters in a glass cube. *Appl Opt* 2009; 48(18): 3385-3390. DOI: 10.1364/AO.48.003385.
- [14] Henderson AR. The design of non-polarizing beam splitters. *Thin Solid Films* 1978; 51(3): 339-347. DOI: 10.1016/0040-6090(78)90297-3.
- [15] Tikhonravov AV, Trubetskov MK. Development of the needle optimization technique and new feature of Opti-Layer design software. *Proc SPIE* 1994; 2253: 10-20.
- [16] Shi JH, Wang ZP. Theoretical analysis of two nonpolarizing beam splitters in asymmetrical glass cubes. *Appl Opt* 2008; 47(13): 275-278. DOI: 10.1364/AO.47.00C275.
- [17] Putilin ES, Gubanova LA. *Optical coatings [In Russian]*. Saint Petersburg: "LAN" Publisher; 2016. ISBN: 978-5-8114-2005-6.
- [18] Hongji Q, Ruijin H, Kui Y, Jianda S, Zhengxiu F. Nonpolarizing and polarizing filter design. *Appl Opt* 2005; 44(12): 2343-2348. DOI: 10.1364/AO.44.002343.
- [19] Vasicek A. *Optics of thin films*. North-Holland, Amsterdam: Interscience Publishers; 1960. ISBN: 978-1-124-14201-2.

### Author's information

**Van Khoa Pham**, (b.1990) graduated from St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University) in 2016, majoring in Optotechnics. Currently he is a graduate student of Photonics and Optoinformatics faculty at ITMO University. Research interests: processing of optical parts, physics of thin films. E-mail: [vhoapham@gmail.com](mailto:vhoapham@gmail.com).

**Thai Phi Ngo**, (b.1987) graduated from St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University) in 2015, majoring in Optotechnics. Currently he is a graduate student of Photonics and Optoinformatics faculty at ITMO University. Research interests: processing of optical parts, physics of thin films, and programming. E-mail: [ngothaiphbn@gmail.com](mailto:ngothaiphbn@gmail.com).

**Ludmila Aleksandrovna Gubanova**, Doctor of Engineering, Professor, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Optical Information Technologies and Materials department, Professor. Research interests: physics of thin films, optic of thin films, manufacture technology of thin films. E-mail: [la7777@mail.ru](mailto:la7777@mail.ru).

*Received May 30, 2016. The final version – January 11, 2017.*